

本資料は2019年11月19日付で技術諮問委員会より提出された報告書を原子力リスク研究センターにて仮訳したものです。正式な報告書は英文版の原文のみとなりますのでご留意ください。

原子力リスク研究センター(NRRC)  
一般財団法人 電力中央研究所  
〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1

2019年11月19日

ジョージ・アポストラキス博士  
一般財団法人 電力中央研究所  
原子力リスク研究センター所長  
〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1

件名: 2020年度NRRC研究計画案

アポストラキス博士殿

2019年11月11日から15日に開催された原子力リスク研究センター（NRRC）の技術諮問委員会（TAC）の第12回会議で、NRRC職員と会合し2020年度研究計画案をレビューした。このレビューの目的は研究計画の技術的メリット及びその計画がNRRCの現在のミッションを支援する上での妥当性についてコメントを提供することであった。

### **結論と提言**

1. 2020年度研究計画全般において重要なギャップはないと判断した。
2. 多くの研究活動がまもなく成熟レベルに達する。これによって、全プラント運転モード中の内部事象、火災や溢水等の内部ハザード、外部事象からのリスクを評価する良質の確率論的リスク評価（PRA）の開発を支援する、というNRRCの目標達成に向けて、それらの研究活動をどの様に活用するか、実際的な実証に移行できる。技術諮問委員会はこうした進展を非常に喜ばしく思っている。
3. 今回のレビュー及びNRRC研究チームとの議論において、2020年度以降の計画において、さらに注目に値する多くの研究活動があることが分かった。本報告書の「議論」セクションにおいて、そうした活動に対する提言を概説する。

## 背景

研究計画の重要目的の1つは、研究ニーズの技術的背景を示すことであり、これには、理論、最新知見、NRRCの目標に対する研究の潜在的な寄与及び重要性が含まれる。研究計画に対するレビューでは、各研究プロジェクトの目的と、その支援タスク、技術的な関連性、これらの活動における相対的な優先度、及び追加研究に対する主要なニーズに焦点を当てた。今回は、研究活動が計画全体を通してどのように統合されているかを理解するために必要となる場合を除き、個々の研究活動の詳細事項または完了までのマイルストーンはレビューしていない。個々の研究プロジェクトの技術要素については、各プロジェクトの詳細レビューで個別にコメントする予定である。

## 議論

今回、NRRC職員が日本の原子力産業界におけるリスク情報を活用した意思決定（RIDM）の導入に関する戦略的計画とフェーズ毎のアプローチの概要を提供してくれた。技術品質の高い包括的なプラント固有のPRAは、RIDMプロセスへの重要なインプットとなるリスク情報及び工学的知見を提供する。そのため、NRRCは、良質のPRA（すなわち、全プラント運転モード中にプラント固有のリスクを評価する、国際的な先行事例があり（state-of-practice）、完全に統合されたレベル1及びレベル2PRA（限定された範囲でのレベル3PRAの拡張を含む））の実施に対する解析手法、モデル、及びデータの改善に関する研究を実施している。これらの研究活動の範囲は、プラント運転経験及びデータの収集と解析、人間信頼性解析、内部火災及び内部溢水の解析手法、シビアアクシデント現象の改善されたモデリング、その他地震、津波、強風及び噴火等の外部ハザードからのリスク評価等、技術的問題を幅広く網羅する。良質なPRAの発展支援に加えて、NRRC研究チームは、RIDMプロセスを支援するためのツールとしてのPRAの利用ガイダンスも策定中である。

今回のレビュー中に、複数の重要研究プロジェクト、各プロジェクトの主要な技術タスク、各タスクの現状、既知または潜在的な問題事項及び各タスク完了のための概略スケジュールに関する簡単な説明を受けた。プロジェクトのタイムライン及びスケジュールは、個々の活動が全体的な研究計画及びNRRCの短期、中期及び長期目標の背景にどのように合致するか説明するのにも役立つ。

2020年度研究計画全般において重要なギャップはないと判断した。

また、多くの研究活動がまもなく成熟レベルに達する。これによって、国際的に実用されている水準（state-of-practice）のPRAの開発を支援する、というNRRCの目標達成に向けて、それらの研究活動をどの様に活用するか、実際的な実証に移行できる。上述の活動には以下が含まれる。

- 地震ハザード解析専門家委員会（SSHAC）手法を用いた伊方プラントサイトの確率論的地震ハザード分析（PSHA）

- 火災PRAガイドの策定
- 人間信頼性解析（HRA）ガイドの策定

技術諮問委員会はこの進展を非常に喜ばしく思っている。

今回のNRRC研究計画レビュー及び研究チームとの議論を基に、選定された個別の研究活動の拡張、適用及びさらなる評価に対して、以下の提言を示す。これらは、2020年度の全体的な研究プログラム及びそれ以降の計画内に組み込まれるべきものである。

### **研究の拡張**

以下の項目は、現行の研究プログラム及び個別の研究活動の拡張に向けた提言を要約したものである。

#### **(1) 低出力及び停止モード中のリスク評価手法及びガイダンス**

日本の産業界は、伊方発電所3号機及び柏崎刈羽原子力発電所7号機の2つのパイロットプラントに対し良質のPRAの開発を積極的に支援している。これらのPRAはNRRC及び産業界の全体的な目標にとって非常に重要である。これらは、プラント固有のリスク及びその寄与因子を包括的に評価するために、国際的な先行事例のある（state-of-the-practice）手法及びモデルをどのように適用するか実証する。また、望まれる品質レベルを達成するために現在のモデル及び解析を更新及び拡張していくこととなるため、全ての日本の事業者のPRA実施者に対して重要な経験及び教訓も提供する。各パイロットプロジェクトの範囲は現在、全出力運転中に生じる内的事象からのリスクを評価するためのレベル1及びレベル1.5PRAモデルの開発に主に焦点を当てている。

各パイロットプロジェクトは、国際的なPRA専門家チームにより実施中の双方向レビューから多大なメリットを得ている。この会議中、伊方発電所3号機の低出力及び停止（LPSD）モード向けPRAモデルに関して最近実施された専門家レビューについて概要の説明を受けた。また、柏崎刈羽原子力発電所7号機のLPSDモデルについて、同様のレビューが今年12月に実施される予定であるとの報告も受けた。

国際的な経験から、停止モード中に生じる事象が全体的なプラントリスクプロファイルに対し重大な寄与因子となり得ることが分かっている。また、停止中のリスク及びその寄与因子は、プラント毎に異なる可能性が非常に高くなることも判明している。さらに、そうしたリスクの評価に必要な手法、モデル、データ、分析技法により、全出力運転時PRAモデルの開発に関する問題とは異なる課題が浮上する可能性もある。

現在のNRRC研究プログラムには、低出力及び停止モード中のリスク評価に対する手法、モデルまたはガイダンスの開発に的を絞った明確な活動が存在しない。ただし、この領域の研究活動範囲は、国内で現在実施されている分析の技術ニーズに合

わせて調整すべきである。2020年度の研究プログラムにおいて、PRAアナリストへのインタビュー及び、伊方発電所3号機及び柏崎刈羽原子力発電所7号機のLPSD PRAに対する専門家レビューの検討を含めることを提言する。また、国際的な先行事例に沿った分析手法及びモデリング技法の開発支援に必要となり得る研究やガイダンスを特定するとともに、そうしたニーズを2021年度以降のNRRC研究プログラムに組み込むことを提言する。

## (2) 保管中の使用済燃料に影響を与える事象のリスク評価に対する手法及びガイダンス

プラント停止モードの国際的PRAモデルには、特定のプラント運転状態（POS）中の使用済燃料の移送及び保管に影響を与える事象のリスク評価が含まれることが多い。これらの事象例としては、POSにおける、プールへの燃料搬入／取り出し中の燃料落下事故、燃料移送中のプール水漏れ、ホウ素希釈、POSにおいて原子炉から取り出して間もない燃料（全燃料移送含む）によるプールの熱負荷上昇に伴う冷却機能不全等がある。外部事象や火災、溢水等の内部ハザードによる損傷も、保管中の使用済燃料に影響を与える可能性がある。最近の国際的PRAの中には、使用済燃料リスク評価をさらに拡張して、一年中プラントの状態や活動も対象とするフルスコープ分析を含めるようになっている。

2020年度NRRC研究プログラムには、使用済燃料の被覆性能試験に向けた活動及び、MAAPコードを用いた、使用済燃料の冷却機能完全損失等の事故による熱流動的な事象進展の評価（燃料プールの代替スプレイ機能の有効性を含む）に向けた活動が含まれる。しかし、現在の研究計画には、使用済燃料の移送または保管に影響を与える事象のリスク評価を行うための統合PRAモデル、手法またはガイダンスの開発に対応した活動が含まれていない。伊方発電所3号機及び柏崎刈羽原子力発電所7号機のプラント停止モード向けPRAモデルの詳細については説明を受けていない。そのため、これらのモデルが使用済燃料に影響を与える事象のリスクについて説明しているのか否か、（しているとしたら）どのように説明しているのか不明である。しかし、既述の通り、この領域の研究活動範囲は、国内で現在実施されている分析の技術ニーズに合わせて調整すべきである。

上記項目（1）で論じられた活動を補完するものとして、2020年度の研究プログラムにおいて、PRAアナリストへのインタビュー及び伊方発電所3号機及び柏崎刈羽原子力発電所7号機のLPSD PRAに対する専門家レビューの検討を含めることを提言する。また、使用済燃料の移送と保管に影響を与える事象のリスク評価に向けた分析手法及びモデリング技法の開発支援に必要となり得るガイダンスまたは研究を特定することを提言する。それらの研究は、まず使用済燃料リスクの分析とプラント停止モードPRAモデルを統合することに焦点を当てた上で、国際的な先行事例に沿った全プラント運転モードを網羅する手法及びモデルへと拡張していくべきである。特定された研究活動は、2021年度以降に開始されるNRRC研究プログラムに組み込まれるべきものである。

### **(3) 地震・津波の複合効果がもたらすリスクを評価するPRA手法及びモデルの実証**

2020年度における地震PRA研究活動のひとつとして、複数の相互依存ハザードの分析技法及び手法の開発が含まれている。特に、地震による津波がもたらす複合的ハザードの評価に第一の焦点を当てた活動であるとの報告を受けた。この研究は日本にとって非常に重要であり、国際的な先行事例の大幅な拡張につながる活動である。

地震による津波のリスクを評価する統合PRAモデルの開発によって、地震のみまたは津波のみを評価する分析では容易に適応できない固有の課題が浮き彫りになる。たとえば、複合ハザードの頻度及び重大度、プラント構造及び設備への同時地震・津波被害への対応PRAモデルの相関依存性を説明するには、特別な技法が必要である。

2021年度以降、本研究を拡張し、サイト毎に地震による津波の複合リスクのモデリング・定量化方法を実証する追加活動含めるよう提言する。

### **(4) マルチユニットPRA研究の範囲**

マルチユニットPRA（MUPRA）研究活動の範囲は、現時点でレベル1リスクの評価のみに限られている。

そのため、すべての内部事象、内部ハザード及び外部事象によるレベル2リスクを評価するのに必要な手法、モデル及びガイダンスを初期段階から検討するアプローチと比べた場合、予期せぬ技術課題やプロセスの繰り返し、研究上の非効率性が生じる可能性がある。例えば、リスク評価技術とPRAモデルがこの40年間で進化を遂げた過程で得られた教訓は、レベル1 PRAモデルのみを開発するための初期段階のガイダンスであっても、統合レベル2PRAの実施に必要なモデルと分析の評価を充実させることでより大きなメリットを得ることができたであろうということである。多くの場合、炉心損傷のみに焦点を絞った場合、結果的に分析の繰り返しやPRAモデルの非効率的な変更が生じてきた。これらは、ガイダンス及びモデルが当初からより幅広い視野に対応していれば不要だったはずのものである。

また、炉心損傷について最も重要な寄与因子が、オフサイト放出についても同様とは限らないことも学んだ。したがって、MUPRA方法案において、複雑なモデルの統合または切り離しを決定する第一指標として炉心損傷頻度しか使用しない場合、施設外放出に影響をもたらすマルチユニット事故シナリオへの重要な寄与因子を不適切に見落とす／隠すことになりかねない。

MUPRA研究範囲は、2020年度以降、レベル1及び2の統合評価を含めるよう提言する。

### **研究の適用**

以下の項目は、特定の研究活動の初期適用に向けた提言を要約したものである。

## (5) 火災PRAガイドの計画的使用

現行の研究計画では、NRRC火災PRAガイドの改訂版が2019年度に完成するとされている。内部火災リスク評価に関する、最新の国際的先行事例がある方法、モデル及びガイダンスを含むものであり、プラント固有のリスクプロファイル全体に重要な貢献をもたらす得る。改訂版ガイドは、国内電力事業者及び国際的な火災PRA実践者のインプットによる恩恵を受けるだろう。

改訂版の使用に関しては、ふたつの考え方がある。ひとつは、NUREG / CR-6850のガイダンスの発行及び使用を通じた米国の経験に基づくものである。すなわち、まずガイダンスを用いてプラント固有の統合火災分析を実施し、その際の経験に基づいて要改善点を特定した上で、一般的に使用できる最終ガイダンスを発行する、という流れが非常に重要である、ということである。もうひとつの考え方は、途中段階での見直し（繰り返し）を省き、国内業界での一般的な使用に向けて直ちに改訂版ガイドを発行すべき、というものである。

もちろん、実際には、ガイドを最初に使用するユーザーは、技術的手法・適用ガイダンス両面で改善点を見つけることはあることが予想される。しかし、米国の経験とは異なり、NRRC火災PRAガイドは、米国やその他の国々でのNUREG/CR-6850の使用で得られた教訓を織り込み済みである（火災分析方法の進展、導入からの年月を経て充実してきたデータ等）。したがって、改訂版ガイドに重大な技術的欠陥またはプログラム上の問題が発覚するリスクは低い。また、そうしたリスク以上に、国内の火災分析のより幅広い段階で適時にガイダンスを利用できるようになることのメリットの方が大きい。

そこで、途中段階での試行や繰り返しを行うことなく、一般的な使用のための火災PRAガイドを発行することを支援する。改訂版の発行後、ガイダンスの技術的な詳細について別途評価を行う。

## (6) 地震PRA実証プロジェクト

2019年度後半または2020年度初頭に開始予定の地震PRA研究活動のひとつとして、地震事象の分析と内部起因事象に対するレベル1PRAモデルを統合する方法を実証するプラント固有モデルの開発がある。この会議において、研究チームは、モデルプラントサイトの選択及び、この実証プロジェクトを支えるPRAモデルについて議論を行った。

この実証プロジェクトでは、伊方発電所3号機及び柏崎刈羽原子力発電所7号機向けパイロットプラントPRAモデルを使用することを提言する。その理由の一部は、会議中に議論した機密情報に基づくものである。しかし、それに加えて、パイロットプラントを適用することにより、高品質で完全に統合されたプラント固有のPRA開発に向けた、地震事象評価の国際的先行事例がある（state-of-the-practice）手法及びモデルの活用方法を最も効果的に実証することができる。様々な内部事象、内部プラントハザード及び外部事象のモデルを一貫して統合し、包括的なリスクプロファ

イルを開発することは、リスク評価プロセスの根本となる要素である。これは異なるプラントに別々のモデルを用いて効果的に実証できるものではない。

伊方発電所3号機及び柏崎刈羽原子力発電所7号機で、内部起因事象に対する良質のPRAモデルが開発中という事実はあるが、この実証プロジェクトにおいては伊方発電所3号機モデルの使用を推奨する。伊方発電所の地震ハザードは、SSHAC手法の高度なレベル3適用により開発されてきた。したがって、地震被害のリスクとフルスコープPRAの統合方法を実証するのに伊方モデルを用いることで、最善の地震ハザード情報を用いたサイト固有の起因事象頻度やプラント構造・設備の脆弱性分析へのインプット策定方法を示すことができる、という優位性も得られる。

#### (7) レベル2PRA実証プロジェクト

2021年度または2022年度あたりに開始予定のレベル2 PRA研究活動のひとつとして、シビアアクシデントの進展及び格納容器性能に対するレベル2モデルと、炉心損傷に対するレベル1モデルを統合する方法を実証するための、プラント固有のモデル及び分析の開発がある。この実証プロジェクトは、伊方発電所3号機及び柏崎刈羽発電所7号機向けパイロットプラントPRAモデルを使用することを提言する。両プラントを使用することで、シビアアクシデント現象の評価、分析手法の適用、PWRとBWRで大幅に異なるモデルの開発のための貴重な経験と洞察が得られる。

#### 研究評価

以下の項目は、各研究活動の再検討に向けた提言を要約したものである。

#### (8) 強風予測ツール

2020年度強風PRA研究活動のひとつとして、「強風リスク検知・予測ツール」の開発がある。研究チームとの議論から、このツールは、特に竜巻に重点を置き、原子力発電所における強風の重大度と到来時間を予測する機能を提供することを目的とするものであると理解している。チームは、一部のプラントでは、強風の到来前に、移動可能な被害緩和装置を確認し、強風で飛ばされる可能性がある飛来物をプラント建屋から遠ざける作業を行うための警告時間が必要になる可能性があることを指摘した。

この研究の技術的ニーズ及び、NRRCがこのツールを開発するのに最適な組織である理由を完全に理解するのに十分な情報を得ていない。NRRCに対して、この研究活動を再検討するとともに、研究プログラム全体の技術的目標と目的及び、国内電力会社のニーズを効果的に支援できているか確認することを提言する。

#### (9) 現象関連ダイヤグラム (PRD) 手法

会議では、現象関連ダイヤグラム (PRD) 手法案の基本コンセプトについて簡単な説明を受けた (2つの簡略化した数値計算含む)。研究チームによると、この方法は、シビアアクシデントの進展、物理的及び熱流動的な現象及び格納容器性能を分析す

るための計算プロセスの合理化を目的とし、関連する不確実要素の効率的な定量化を促進するものである。会議中に提供された情報からは、適用例における簡略モデル及び想定が、国際的な先行事例のある最善のリスク評価予測に求められる、複雑な現象論的・時間的依存性の処理等の分析機能を提供するものであるか、明確ではない。

MELCORやMAAPなどの分析ツールは多くのリソースを必要とし計算も複雑であるが、国際的には、事故の進展と格納容器性能の統合分析の確固たる技術基盤をもたらすものとして受け入れられている。また、研究プロジェクトでは、レベル2、3PRA分析における不確実性をいかに定量化するか、多大な計算上の負担を伴うもののMELCOR及びMACCSコードの統合適用を通じて実証している。

まとめると、より優れた事例や現状における最良の推定による分析結果とのベンチマーク比較が無くては、PRD方法案がすでに確立されたモデリングツールの代替方法となる理由を理解し難い。NRRCに対して、この研究活動を再検討するとともに、研究プログラム全体の技術的目標と目的及び、国内電力会社のニーズを効果的に支援できているか確認することを提言する。

全体的な研究プログラム及び個々の研究プロジェクトをレビューし、NRRC及び日本の原子力産業界が包括的なリスク情報を活用した意思決定という目標を達成するためにNRRC研究チームと引き続き業務を続けていくことを楽しみにしている。

敬具  
ジョン W. ステットカー（本人署名）  
委員長

参考資料  
記載略